Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
Band: 37 (1982)

Artikel: Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen
Autor: Nürnberger, U.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-28913

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen

Fatigue Resistance of Reinforcing Steel

Résistance à la fatigue de l'acier d'armature

U. NÜRNBERGER
Dr. -Ing.
Otto-Graf-Institut
Stuttgart, BRD

ZUSAMMENFASSUNG
Überblick über das Dauerschwingverhalten von Betonstählen. Erörterung der Einflüsse stahlunabhängiger Faktoren wie Mittelspannung, Frequenz, Beton und Korrosion sowie werkstoffabhängiger Grössen wie Rippung (Kerbwirkung), Durchmesser, Krümmung, Materialgüte (warmgewalzt, kaltverformt), Feuerverzinkung und Schweissen. Feststellung, dass die Kerbwirkung der Rippen, das Krümmungsverhältnis bei gebogenen Stäben, Korrosion und ein Schweissen das Dauerschwingverhalten der Betonstähle am nachhaltigsten beeinflussen.

SUMMARY
A survey of the fatigue behaviour of reinforcing steels is given. This considers the effect of steel dependent parameters such as: material quality (hot rolled or cold deformed), ribs (notch effect), diameter, curvature, hot-dip galvanizing and welding. The influence of independent factors such as: average stress, frequency, concrete and corrosion are also covered. The main influence on fatigue behaviour are isolated as: the notch effect of the ribs, the ratio of curvature of the bent bars, corrosion and welding.

RESUME
Un aperçu du comportement à la fatigue des aciers d'armature est donné. On considère l'influence des facteurs indépendants de l'acier tels que: contrainte moyenne, fréquence, béton et corrosion. L'influence des facteurs dépendant de l'acier tels que: nervures (effet d'entaille), diamètre, courbure, qualité du matériau (laminé, écroui à froid), zingage à chaud et soudage est également traitée. Il a été constaté que le comportement à la fatigue des aciers d'armature est influencé dévaforablement par l'effet d'entaille des nervures, le rapport de courbure des barres fléchies, la corrosion et le soudage.

1. EINFÜHRUNG

Im Stahlbetonbau, besonders bei Brücken, Kranbahnen, befahrenen Decken nehmen die Anteile wechselnder Lasten an der Gesamtbelastung ständig zu; das Schwingfestigkeitsverhalten der Betonstähle stellt daher eine wichtige Güteeigenschaft dar und wurde umfangreich untersucht [1 - 6].

Die Sicherheit der Bauwerke erfordert es, einen Werkstoff einzusetzen, der unter den ungünstigsten vorkommenden Betriebsbedingungen geprüft wurde. In Deutschland wird daher die Dauerschwingfestigkeit von Betonrippenstählen als Zugschwellfestigkeit am einbetonierten, gekrümmten Stab ermittelt. Im Ausland erfolgt die Prüfung bevorzugt am einbetonierten, geraden Stab (Fig. 1).

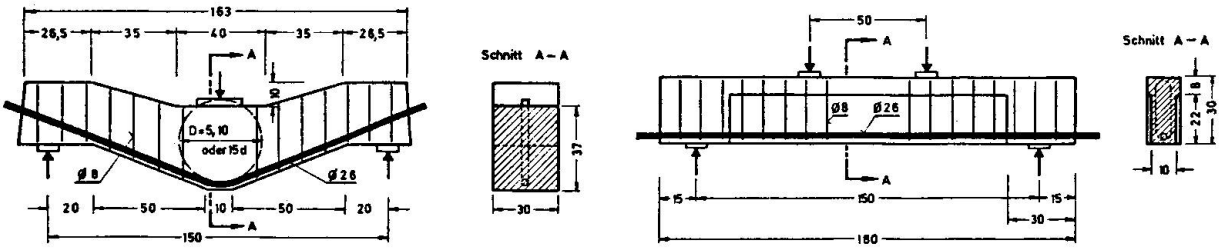


Fig. 1 Testing concrete reinforcing bars

Das Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen wird sowohl von stahlunabhängigen als auch stahlabhängigen Faktoren beeinflußt.

2. EINFLÜSSE STAHLUNABHÄNGIGER FAKTOREN

Bei Betonrippenstählen ist der Einfluß der Mittelspannung gering, solange die Oberspannung die Streckgrenze nicht überschreitet (Fig. 2). Bei nichteinbetonierten Stählen ist der Frequenzeinfluß von untergeordneter Bedeutung.

Bei Prüfung in gerissenen Betonkörpern liegen besondere Verhältnisse vor. Bei sich oftmals wiederholenden Belastungen tritt ausgehend von den Rissen eine all-

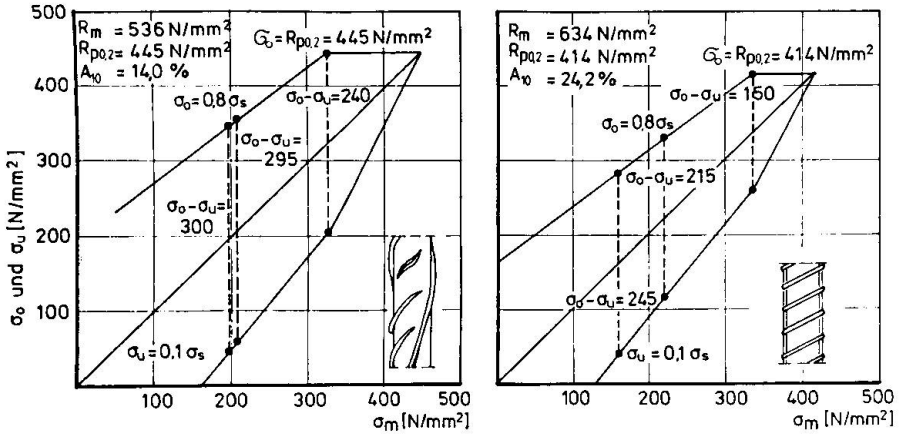


Fig. 2

Smith diagram of reinforcing bars

mähliche Lösung des Verbundes ein, was je nach Verbundverhalten und Beanspruchung zu einem Gleiten des Stahls im Beton und zu dauerfestigkeitsmindernden Schädigungen durch Reibkorrosion führen kann. Glatte Stähle verhalten sich diesbezüglich ungünstiger als gerippte. Für die Praxis ist auch von Bedeutung, daß im Bereich von Betonrissen eine Korrosion am Stahl stattfinden kann, wodurch

ebenfalls das dynamische Verhalten verschlechtert wird. Reibkorrosion und Schwingungsrißkorrosion sind zunächst vom pH-Wert, der Feuchtigkeit und dem Gehalt korrosionsfördernder Stoffe im Riß abhängig. Alle mit Korrosion verbundenen Einflüsse kommen bei niedrigen Frequenzen stärker zum Ausdruck als bei hohen. Auf Grund von 3 - 12monatigen Versuchen wurde bei Betonstählen in gerissenen Betonbalken bei Seewasserangriff eine Erniedrigung der Dauerschwingfestigkeit um etwa 40 % festgestellt. Fig. 3 zeigt zum Vergleich das Aussehen von Brüchen nach reiner Ermüdung bzw. Schwingungsrißkorrosion.

Bei Prüfung im einbetonierten Zustand und ohne Korrosionseinwirkung ist der Einfluß der Betongüte von untergeordnetem Einfluß. Bei gekrümmten Stäben wirken sich Hohlstellen im Bereich der Krümmung nachteilig aus, da diese Zusatzspannungen aus Aufbiegungen bewirken.

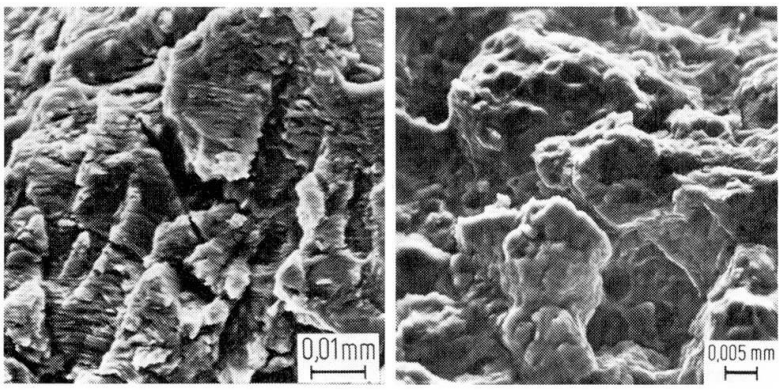


Fig. 3

Fracture surface of hot rolled bars,

left : fatigue
right: corrosion fatigue

3. EINFLÜSSE STAHLABHÄNGIGER FAKTOREN

3.1 Stahloberfläche

Eine maßgebliche Beeinflussung des Schwingfestigkeitsverhaltens erfolgt durch die Ausbildung der Rippen (Fig. 4), die je nach Formgebung eine mehr oder weniger starke Kerbwirkung ausübt. Je nach Abmessung der Rippen und Ausrundungen der

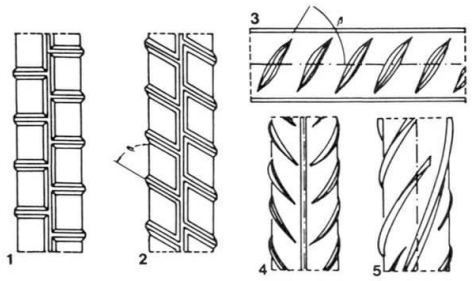


Fig. 4 Reinforcing ribbed bars

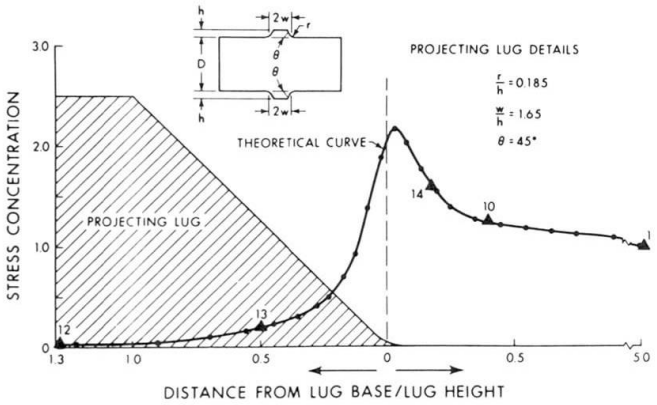


Fig. 5 Stress gradient at base of projecting lug (Jhamb, Mc Gregor)

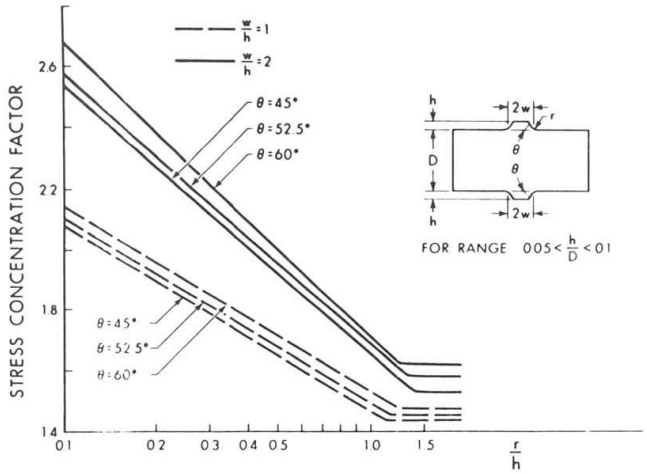


Fig. 6 Effect of projecting lug parameters on stress concentration factor (Jhamb, Mc Gregor)

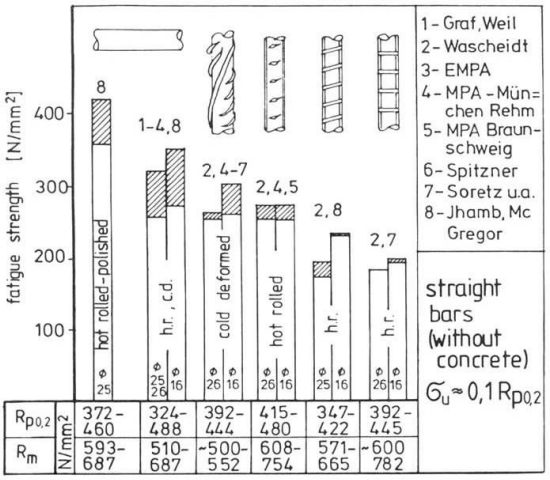


Fig. 7 Fatigue strength of reinforcing bars

Übergänge treten bei Belastung am Rippenfuß Spannungsspitzen auf (Fig. 5). Der die Spannungsspitze im Kerbgrund der Profilrippen kennzeichnende Spannungskonzentrationsfaktor ist in Fig. 6 als Funktion der geometrischen Abmessungen der Rippen dargestellt. Dieser Wert nimmt insbesondere mit abnehmendem Verhältnis r/h zu. Bei deutschen Betonrippenstählen liegen die Spannungskonzentrationsfaktoren etwa zwischen 1,5 und 1,8.

Neben der Rippenform beeinflußt auch die Rippenanordnung das Prüfergebnis. Nach Fig. 7 nimmt die Dauerschwingfestigkeit in der Reihenfolge glatte Stäbe, sichelförmige Schrägrippen, einbindende Schräg- bzw. Querrippen ab. Wegen des Einflusses der Reibkorrosion können sich glatte Stäbe im einbetonierten Zustand ungünstiger verhalten als gerippte. Die Kerbwirkung der Rippen wirkt sich besonders im gebogenen Zustand aus. Das Verhältnis der Dauerschwingfestigkeiten gebogener (D/d=15) einbetonierter Stähle zu dem freier gerade Stäbe beträgt

- glatte Stäbe 0,67 - 0,71
- Stäbe mit sichelförmigen Schrägrippen 0,57 - 0,86
- Stäbe mit einbindenden Schräg- bzw. Querrippen 0,40 - 0,43.

Den Einfluß der Kerbwirkung der Rippen auf die Bruchbildung verdeutlicht Fig. 8. Weitere dauerfestigkeitsmindernde Faktoren sind walztechnisch bedingte Längsris-

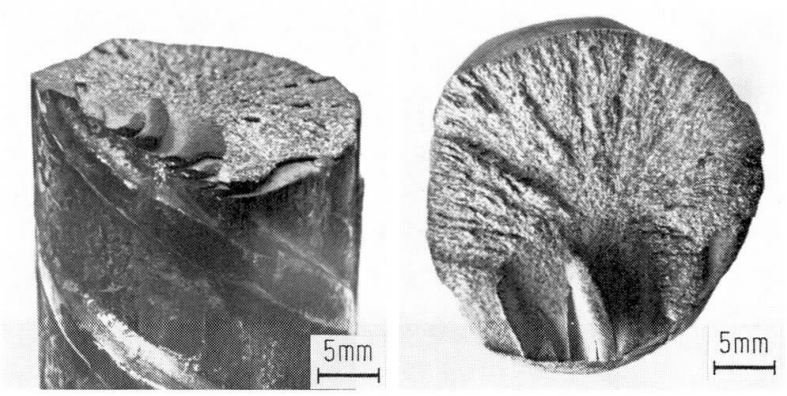


Fig. 8

Fatigue fracture of hot rolled ribbed bar

se, Überwalzungen, Korrosionsnarben, mechanische Beschädigungen, Grobkorn an der Oberfläche, Randentkohlungen und Korngrenzentrennungen z.B. als Folge von Kupfereinwanderungen aus dem Zunder.

3.2 Durchmesser

Bei geraden Stäben ist der Durchmessereinfluß gering. Bei gebogenen Stäben verhalten sich dünnere Stäbe häufig etwas ungünstiger als dickere (Abschnitt 3.3).

3.3 Krümmung

Bei gebogenen, einbetonierten Stäben tritt gegenüber freien, geraden stets eine Abminderung der Dauerschwingfestigkeit ein, die umso stärker ausfällt, je geringer der Biegedurchmesser D im Verhältnis zum Stabdurchmesser ist (Fig. 9). Bei Rippenstählen mit sichelförmigen Schrägrippen beträgt die Abminderung:

D/d = 25 : 0 %

D/d = 15 : 16 - 22 %

D/d = 10 : 22 - 41 %

D/d = 5 : 52 - 68 %

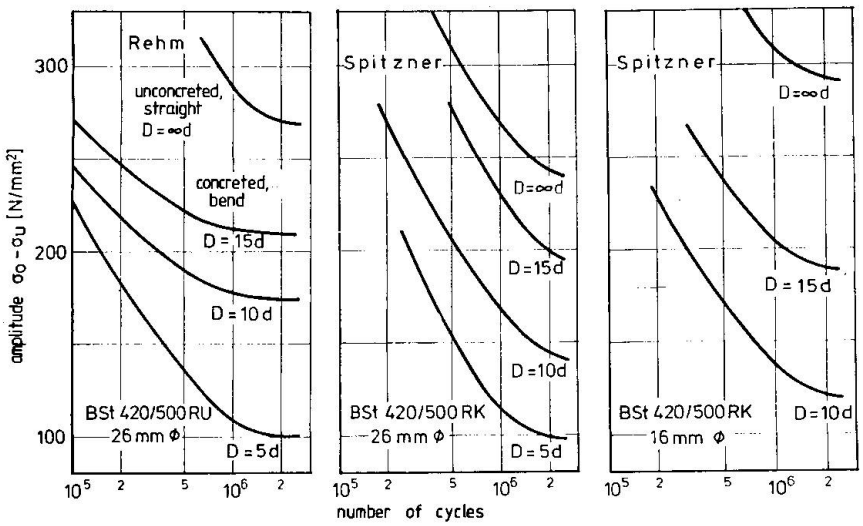


Fig. 9

Influence of bending ratio D/d on fatigue behaviour (Rehm, Spitzner)

Das ungünstigere Verhalten gekrümmter Stäbe gegenüber geraden wird zurückgeführt auf Kaltverformung, Eigenspannungen und Zusatzspannungen infolge Krümmungsaufweitung. Beim Biegen von Rippenstählen kommt es an den Übergängen Stabkern/Rippen zu örtlich hohen plastischen Verformungen. Dadurch wird die Verformungsfähigkeit örtlich stark erniedrigt (insbesondere nach Alterung) und die Kerbwirkung der Rippen erhöht.

Beim Biegen von Betonstählen entstehen auf der Krümmungsinnenseite Zugeigenspannungen von bis zu 70 % der Streckgrenze (Näherung I), die im Kerbgrund der Rippen noch höher sein können. Diese Eigenspannungen wirken im Prinzip wie Mittelspannungen. Bei Belastung der Probe und bei Schwingbeanspruchung werden die Eigenspannungen durch plastische Verformung weitgehend unwirksam.

Bei gebogenen, einbetonierten Stäben bewirken die bei Belastung in den geraden Schenkeln wirkenden Zugspannungen Umlenkpressungen und Betonverformungen im Krümmungsinnenbereich der Krümmung. Deshalb kann sich der Stab aufweiten, woraus im Krümmungsinnenbereich der Stähle (hier liegen stets die Bruchausgänge) Zusatzbeanspruchungen resultieren, die sich den rechnerischen Spannungen überlagern. Fig. 1C zeigt die Zusammenhänge für unterschiedliche Krümmungen und Stabdurchmesser.

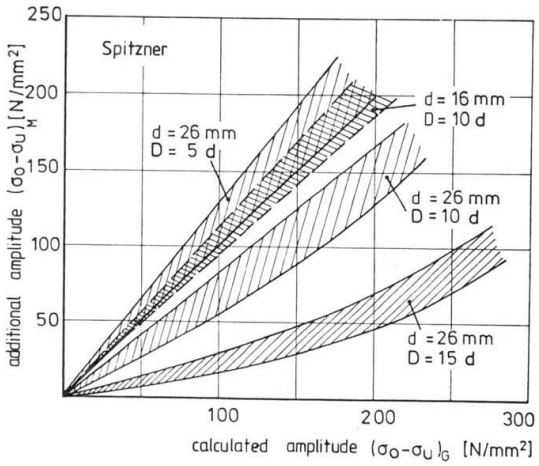


Fig. 10

Coherence between calculated and additional amplitude caused by increase of bending of the bars (Spitzner)

3.5 Materialgüte

Untersuchungen an warmgewalzten Betonrippenstählen auf C-Si-Mn Basis ergaben:

1. Die ungünstigsten Werte zeigen Betonstähle mit erhöhten Kohlenstoffgehalten ($\geq$ 0,38 %) (Fig. 11).

2. Stähle mit niedrigen Lastspielzahlen haben oftmals ein grobkörniges Gefüge und erhöhte Gehalte an Schwefel und Kupfer.

3. Feinkornstähle weisen bei gleicher Festigkeit insgesamt ein etwas besseres Dauerschwingverhalten auf als C-Si-Mn Stähle.

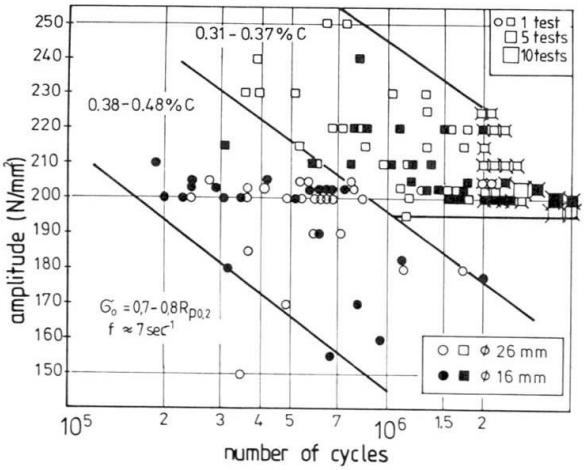


Fig. 11

Fatigue behaviour of hot rolled ribbed bars, bend samples in concrete (D/d = 15, σ_o = 0,7 $R_{p0,2}$, $f \approx 5\ sec^{-1}$)

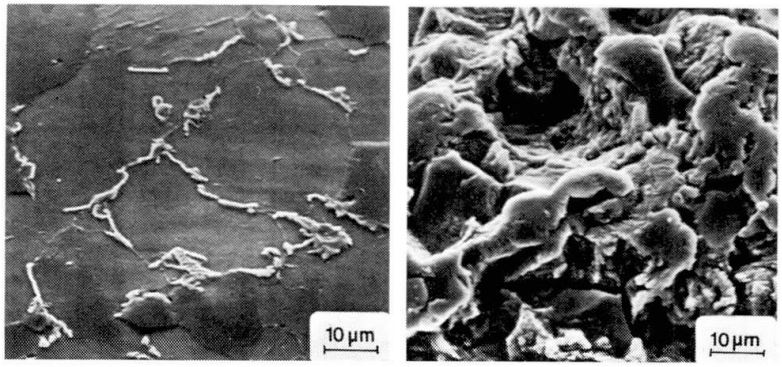


Fig. 12

Structure and fracture of cold deformed steel with perlite breakdown

Bei kaltverformten Betonrippenstählen aus kohlenstoffarmem Stahl wurden bei ungünstigem dynamischen Verhalten folgende legierungstechnische und gefügemäßigen Besonderheiten festgestellt:

1. Der Kohlenstoff ist nicht in der üblichen perlitischen Form, sondern als sogenannter entarteter Perlit (Zementit) an den Korngrenzen ausgeschieden. (Fig. 12).

2. Die Stähle weisen einen erhöhten Phosphorgehalt (> 0,045 %) auf.

3.6 Feuerverzinkung

In jüngster Zeit werden Stabstähle und Betonstahlmatten des öfteren zum Zwecke des Korrosionsschutzes feuerverzinkt. Bei Stabstählen wurde im gebogenen und einbetonierten Zustand gegenüber unverzinkten Stäben eine Abnahme der Dauerschwingfestigkeit um etwa 12 % festgestellt. Vermutlich resultiert aus den Reaktionen des Zinks mit dem Frischbeton eine Wasserstoffversprödung der stark kaltverfestigten und den Bruch auslösenden Rippenansätze. Bei Betonstahlmatten wird die Dauerschwingfestigkeit im nicht einbetonierten Zustand i.M. um 35 % verbessert (Fig. 13). Als eine Ursache dieses positiven Effekts kann ein verstärkter Abbau von Schweißeigenspannungen im Zinkbad angesehen werden.

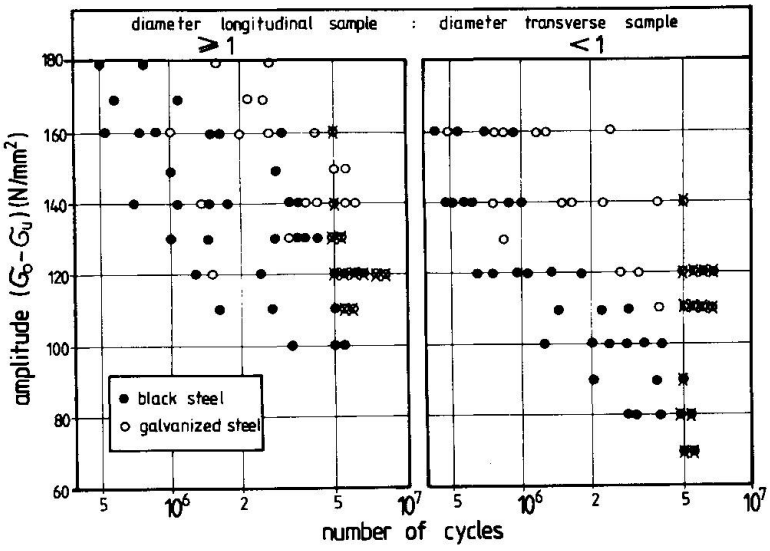
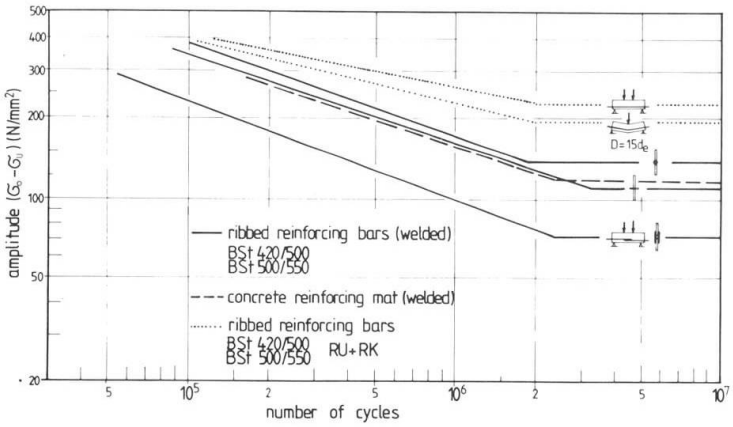


Fig. 13

Fatigue test of welded black and galvanized concrete reinforcing mat (σ_o = 0,7 $R_{p0,2}$, f = 125 sec^{-1})

3.7 Schweißen

Die Schweißverbindungen der Betonstähle weisen generell ein ungünstigeres Schwingfestigkeitsverhalten auf als ungeschweißte Stähle (Fig. 14). Die Unterschiede der Schweißverbindungen werden hauptsächlich durch die Verbindungsform (geometrische Kerbwirkung) geprägt. Die anderen Parameter wie Grundwerkstoff, Durchmesser, Schweißverfahren und Schweißausführung sind von geringerer Bedeutung. Bei geschweißten Stählen wird das Schwingfestigkeitsverhalten in der Reihenfolge Laschenstoß, Kreuzungsstoß, Stumpfstoß verbessert. Betonstahlmatten weisen ein den Kreuzungsstößen vergleichbares Verhalten auf. Bei den Betonstahlmatten verhalten sich jedoch Verbindungen mit großem Verhältnis von Prüfstab/Querstab insgesamt besser als solche mit kleinem Verhältnis. Einbetonierte Schweißverbindungen verhalten sich im Versuch oftmals besser als freie Schweißverbindungen.



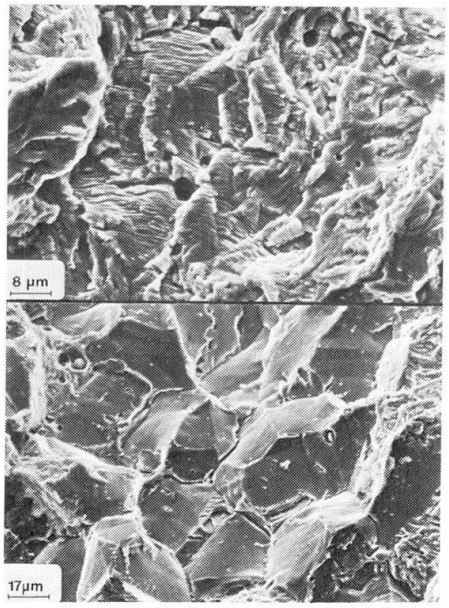


Fig. 14 Woehler diagram of unwelded and welded reinforcing ribbed bars

Fig. 15 Fracture surface of welded overlap splices of hot rolled bar above: centre, below: fracture beginning

Das Schweißnahtgefüge kann in Ausnahmefällen ebenfalls das Ergebnis beeinflussen (metallurgische Kerbwirkung). Ein ungünstigeres Verhalten wurde bei kleineren Stabdurchmessern kaltverformter Stähle infolge Entfestigung und bei warmgewalzten Stählen dickerer Abmessung und erhöhtem Kohlenstoffgehalt infolge Aufhärtung festgestellt. Im letzteren Fall unterscheidet sich die interkristalline Bruchstruktur im Aufhärtungsbereich am Bruchausgang deutlich von der übrigen Bruchstruktur (Fig. 15).

REFERENCES

1 Spitzner, J.: Zur Prüfung von Betonrippenstahl unter schwingender Beanspruchung im freien und einbetonierten Zustand. Dissertation, TH Darmstadt, 1971.

2 Jhamb, I.C., Mac Gregor, J.G.: Fatigue of reinforcing bars. Structural Engineering Report No. 39, University of Alberta, Department of civil engineering, 1972.

3 Tilly, G.P.: Fatigue of steel reinforcement bars in concrete, a review. Fatigue of Engineering Materials and Structures. 2 (1979) 251/68.

4 Harre, W., Nürnberger, U.: Zum Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter wirklichkeitsnahen Beanspruchungsbedingungen. Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Heft 75, Stuttgart 1980.

5 Nürnberger, U.: Technologische Eigenschaften von kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl nach einer Feuerverzinkung. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 318, Berlin 1981.

6 Rehm, G., Harre, W., Nürnberger, U., Rußwurm, D.: Untersuchungen über die Schwingfestigkeit geschweißter Betonstahlverbindungen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 317, Berlin 1981.